

## ITO, AZO, SZO 박막의 수소 플라즈마에 대한 안정성

임원택 · 안유신 · 이상기 · 안일신 · 이창호

한양대학교 물리학과  
(1997년 2월 20일 접수)

### The stability of ITO, AZO and SZO thin films in hydrogen plasma

Won-taeg Lim, You-shin Ahn, Sang-gi Lee, Il-sin An and Chang-hyo Lee

Department of Physics, Hanyang University  
(Received February 20, 1997)

**요 약** - ITO, AZO, SZO 투명전도박막의 수소 플라즈마에 대한 안정성에 관하여 연구하였다. ITO는 Corning 사의 제품을 사용하였고, AZO와 SZO는 rf magnetron sputtering 방법으로 증착한 것을 이용하였다. 이 세 가지 투명전도박막을 PECVD 챔버 내에 장착한 다음, 수소 플라즈마에 노출시켰다. 이 때 ITO 박막의 광투과도는 시편 표면의 온도와 시간이 증가할수록 감소하였는데 특히 300°C에서 30분간 노출시켰을 때 10~20% 정도의 광투과도를 나타내었으며, 박막의 전도성을 완전히 잃어 버렸다. 반면 AZO와 SZO의 경우, 수소 플라즈마 노출 온도와 시간에 대해 전반적으로 광투과도 손실이 나타나지 않았다. 하지만 박막내 수소의 유입으로 인하여 흡수대가 단파장 쪽으로 이동하는 'Burstein-Moss' 효과가 나타났다. 또한 표면구조에서도 AZO와 SZO가 수소 플라즈마 노출에 대해 안정성을 보인 반면 ITO의 표면은 indium과 tin의 금속입자로의 환원으로 인해 매우 거칠어짐을 보였다.

**Abstract** - The stabilities of ITO, AZO, and SZO have been studied in hydrogen plasma. We used the ITO films produced from Corning LTD. and AZO, SZO films made by rf magnetron sputtering methods. These films were loaded in PECVD chamber and exposed to hydrogen plasma. For ITO, the optical transmittance was decreased as sample surface temperature and exposure time were increased during hydrogen plasma treatment. The transmittance of ITO dropped to 10~20% and its conductivity disappeared completely after exposing to hydrogen plasma for 30 minutes at 300°C. For AZO and SZO, there was no optical loss but the optical gap was widened due to the hydrogen incorporation into the film, indicating Burstein-Moss effect. Also the surface morphology of AZO and SZO was stable in hydrogen ambient but ITO showed rough surface due to the reduction of metal elements.

## 1. 서 론

Transparent conducting oxide(TCO)는 액정 디스플레이(LCD), 플라즈마 디스플레이 패널(PDP) 등의 평판 디스플레이(flat panel display)의 전극과 태양전지의 윈도우(window), 그리고 여러 가지 광전자 디바이스의 투명 전극으로 사용된다. 이러한 투명전극으로는 현재 가장 많이 상용화되어 있는 indium tin oxide(ITO), fluorine-doped tin oxide(FTO)를 비롯하여[1-5], 최근에 많이 관심을 갖는 aluminum-doped zinc oxide(AZO), silicon-

doped zinc oxide(SZO) 등이 있다 [6-10]. 투명전도박막은 가능한 높은 광투과도와 전기전도도를 가져야 하며, 기존의 연구는 이러한 특성을 개선시키는데 주안점을 두면서 발전해 왔다. 그러나 투명전도박막을 여러가지 디바이스의 전극으로 사용했을 때 나타날 수 있는 박막의 신뢰도 및 내구성에 대한 평가가 제대로 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 비정질 실리콘 태양전지의 투명전극에 관심을 두고자 한다. 여기서 사용되는 전도박막은 hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) 증착 시 silane 개

스의 분해로 발생하는 수소 플라즈마에 대한 내구성이 반드시 필요하다. 특히 microcrystalline silicon( $\mu\text{c-Si:H}$ ) 박막을 증착시킬 때는 비정질 실리콘을 증착시킬 때 보다 수소 기체의 함유량이 수십 배로 증가하므로 그 영향에 대한 연구는 더욱 절실하다. 또한 a-Si:H 박막의 최적 증착 조건으로 기판온도가 약  $250^\circ\text{C}$ 가 되어야 하므로 온도에 대한 안정성도 있어야 한다. a-Si:H 박막은 주로 plasma enhanced chemical vapor deposition(PECVD)의 방법으로 증착되는데 최적 조건에서 그 성장률이 약  $1\sim 2 \text{ \AA}/\text{초}$  이고  $\mu\text{c-Si:H}$ 의 경우는 이보다 훨씬 낮다. 또한 이들 박막의 성장 초기는 layer-by-layer의 성장이 아닌 nucleation의 과정을 반드시 거치기 때문에 투명전극 기판은 수초에서 수십초 동안 수소 플라즈마에 노출이 된다[11].

비정질 태양전지의 기판으로 사용되는 투명전극은 indium이나 tin이 함유된 물질이 전도도 면에서 좋아 현재까지 많이 사용되고 있으나, 가격면이나 위에서 언급한 수소에 대한 안정도 때문에 최근에 ZnO를 기초로 한 투명전극 연구가 활발하다. 또한 ZnO는 각종 외래 물질로 도핑이 잘되며 그에 따른 광학적 성질이나 전기적 성질이 아주 손쉽게 변하기 때문에 임의 조작이 가능한 장점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 ZnO의 전도성 향상을 위해 많이 연구되고 있는 AZO와 SZO 박막을 rf-magnetron sputtering 방법으로 증착시키고 상용으로 구할 수 있는 ITO와 함께 이들을 수소 플라즈마와 수소 원자에 노출시킨 후 광학, 전기, 구조적 성질을 중심으로 그 안정도를 조사하고자 한다.

## 2. 실험 방법

사용된 ITO 시편은 Corning 사 제품이며, AZO, SZO 시편은 slide glass 위에 rf magnetron sputtering 방법으로 증착한 것이다. AZO, SZO 박막의 증착조건은 rf power, flow rate, 프로세스 압력을 각각  $2.33 \text{ W}/\text{cm}^2$ ,  $13 \text{ sccm}$ ,  $6 \text{ mTorr}$ 로 고정하였으며 working gas로는 Ar을 사용하였으며, 증착온도는  $250^\circ\text{C}$ 로 고정하였다. 이 때 사용한 AZO, SZO 타겟은 ZnO(5N)에 Al과 Si가 각각 2.0 wt%, 1.6 wt%를 혼합한 것이다. 이러한 조성비는 실험을 통해 확인한 박막의 비저항이 최소가 되는 조건이다[12].

사용한 AZO, SZO, ITO 시편의 두께는 Dectak III [Veeco] Surface Profiler로 측정된 결과 각각  $138(\pm 5\%)$

nm,  $210(\pm 5\%)$ nm,  $250(\pm 5\%)$ nm 이었다.

이 세 가지 시편을 PECVD chamber 내에 장착한 다음 수소 플라즈마를 발생시켰다. 사용한 chamber는 실제로 비정질 실리콘을 증착하는 장비이며, 기타 증착조건은 실험에서 최적화된 태양전지용 비정질 실리콘을 증착하는 조건을 그대로 따랐다. 다만 수소와의 반응에 중점을 두었기 때문에  $\text{SiH}_4$  가스를 사용하지 않고 순수한 수소만을 사용했을 뿐이다. RF power,  $\text{H}_2$  flow rate는 각각  $60 \text{ mW}/\text{cm}^2$ ,  $24 \text{ sccm}$ 이며 프로세스 압력은  $200 \text{ mTorr}$ 로 고정하였다. 먼저, 수소 플라즈마 노출 시 온도에 따른 박막의 화학반응을 알기 위하여 노출 시간을 30분으로 고정하고, 시편의 온도를 상온,  $100$ ,  $200$ ,  $300^\circ\text{C}$ 로 변화시켰다. 일반적으로 비정질 실리콘을 증착하는 과정에서 기판의 온도는  $300^\circ\text{C}$ 를 넘지 않기 때문에 그 이상의 온도에 대한 실험은 하지 않았다. 다음으로 노출시간에 따른 박막의 화학반응을 알기 위해 시편 온도를  $250^\circ\text{C}$ (a-Si:H 증착시 최적화된 온도)로 고정하고, 수소 플라즈마 노출 시간을 10, 30, 60, 90초로 각각 변화시켰다. 실제 비정질 실리콘 증착과정에서 수소 플라즈마에 직접 노출되는 시간은 핵들이 성장하여 표면을 덮게되는 nucleation 단계이므로 수초 정도이다. 또한 수소 플라즈마 뿐만 아니라 수소 원자에 의한 영향을 알아 보기 위해 수소환경 속에 텅스텐 filament를 넣고 가열하여 같은 실험을 반복하였다.

제작한 시편의 광투과도는 Beckman DU-70 Spectrophotometer를 사용하여  $320\sim 800 \text{ nm}$ 의 범위까지 측정하였다. 시편의 비저항은 4단자법(4-point probe method)으로 측정하였으며, 이 때 전류공급은 Programmable Current Source [Keithley 214], 전압측정은 Programmable Electrometer[Keithley 617]를 사용하였다. 그리고 시편 표면의 미세구조는 atomic force microscope(AFM)로 조사하였다.

## 3. 실험 결과 및 논의

그림 1은 수소 플라즈마 노출 전의 ITO, AZO, SZO 세 시편의 광투과도 스펙트럼이다. 준비한 시편 모두가 가시광선 영역에서 80% 이상의 광투과도를 나타낸다. 박막마다 파장에 따른 투과도가 조금씩 차이를 보이는 것은 두께에 의한 차이와 간섭효과가 나타나기 때문이다.  $400 \text{ nm}$  이상의 파장에서는 ITO 보다 AZO, SZO 박막이 약간 높은 광투과도를 보이나 광투과 영역면에서

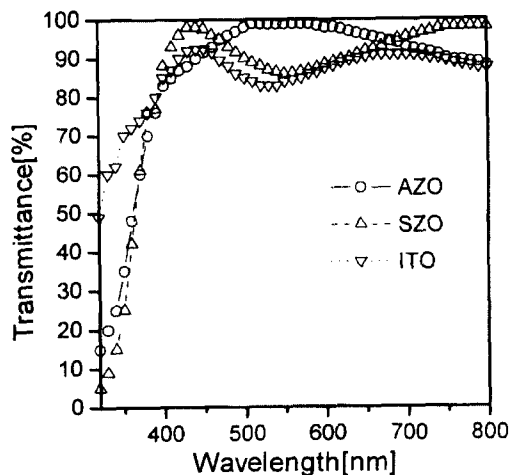


그림 1. 수소 플라즈마 노출전 시편의 광투과도. (○: AZO; △: SZO; ▽: ITO)

는 ITO가 넓다. 전반적으로 가시광선 영역에서 비슷한 투과율을 보이고 있으므로, 전기전도도 등 다른 특성면에서의 개선이나 장점이 있으면 AZO, SZO의 경우 고가의 ITO를 대체할 수 있을 것으로 보인다.

그림 2는 수소 플라즈마 노출 후 ITO 박막의 광투과도이다. 수소 플라즈마 노출 시 시편의 온도를 상온, 100, 200, 300°C로 변화시켰으며, 수소 플라즈마와 충분한 반응을 알기 위해 노출 시간은 30분으로 고정하였다. 기판의 온도가 증가할수록 ITO의 광투과도가 감소함을

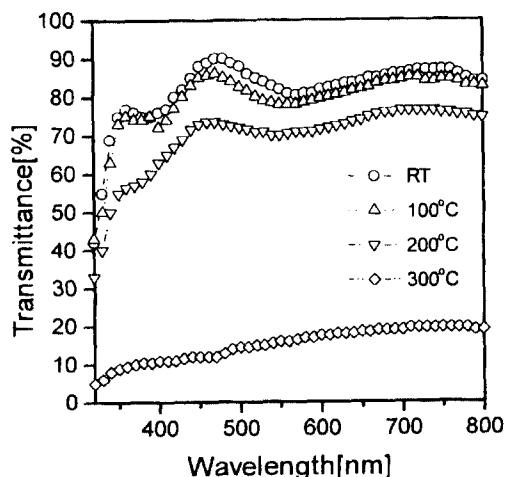
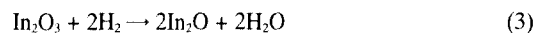
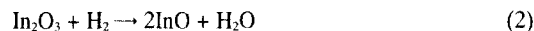
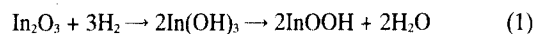


그림 2. 수소 플라즈마 30분간 노출시켰을 때, 기판온도에 따른 ITO 박막의 광투과도. (○: 실온; △ 100°C; ▽: 200°C; ◇: 300°C)

알 수 있고, 특히 300°C일 때 가시광선 영역에서 ITO의 광투과도는 10~20% 정도이었고, 표면의 상태는 육안으로 확인할 수 있을 정도로 거칠었다. 위의 결과는 ITO가 수소와 반응하여, 즉 박막 표면 또는 내부에서  $\text{In}_2\text{O}_3$ 의 환원반응이 일어나 박막의 광투과도를 감소시킨다는 기존의 연구 결과와 유사함을 알 수 있었다[13].

일반적인 ITO는 90 wt%의  $\text{In}_2\text{O}_3$ , 10 wt%의  $\text{SnO}_2$ 로 구성되어 있다. ITO의 주성분인  $\text{In}_2\text{O}_3$ 와 수소의 가능한 화학반응을 요약하면 다음과 같다[14],[15].



본 실험에 의하면 시편 온도를 상온에서 200°C까지 변화시키면서 수소 플라즈마에 노출시킨 경우, 육안으로 식별할 때 온도가 증가함에 따라 시편의 색상이 점차 검게 변함을 알 수 있었다.

그림 3은 수소 플라즈마 노출전 ITO와 기판온도 300°C에서 노출시킨 시편의 X-선 회절 그림이다. 300°C에서 30분간 수소 플라즈마 노출된 ITO는 처음의 결정구조와 많은 차이를 보임을 알 수 있었다. 즉 기존의 결정구조가 상당히 파괴되었으며 새로운 InOOH 상이 존재함을 알 수 있었다. 따라서 (1)번의 환원과정이 상당히

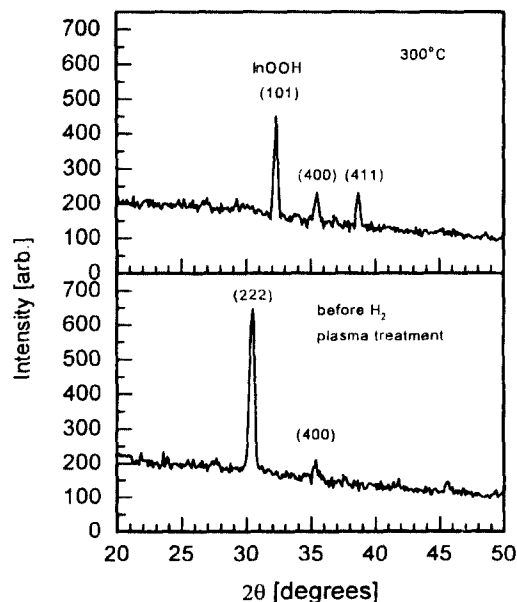


그림 3. 수소 플라즈마 노출전과 300°C에 30분간 노출시켰을 때, ITO박막의 XRD 패턴.

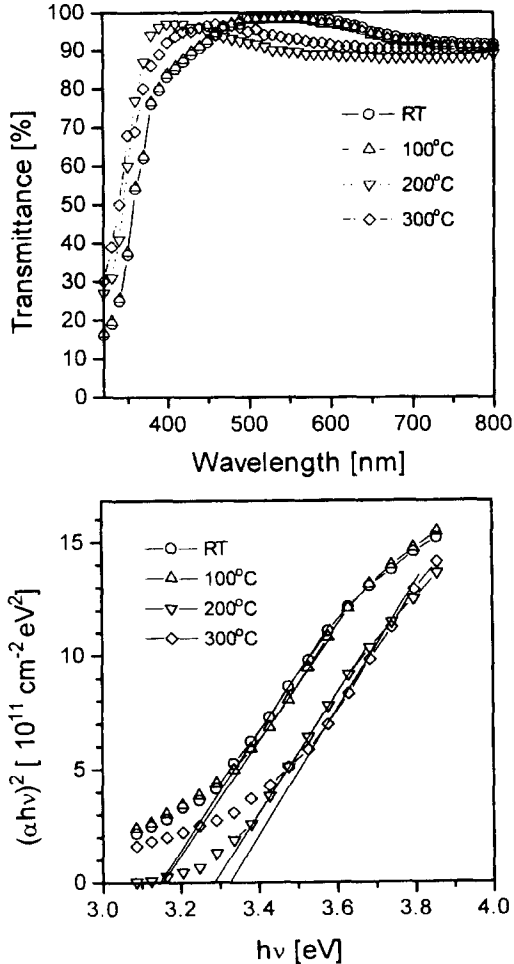


그림 4. 수소 플라즈마에 30분간 노출시켰을 때, 기판온도에 따른 AZO 박막의 광투과도 및 Tauc Plot. (○: 실온; △: 100°C; ▽: 200°C; ◇: 300°C)

진행된걸로 보여지며 이 반응에 의한 산소의 결핍이 ITO 박막 표면 또는 내에서 black matrix를 형성하여 전체 ITO의 광투과도를 감소시키는 한 원인이 된다고 생각된다.

그림 4는 수소 플라즈마 노출 후의 AZO 박막의 광투과도 및 Tauc Plot 이다. Tauc Plot에서 광학적 에너지 갭은  $(\alpha hv)^2 = A (hv - E_g)$ 의 식을 이용하여 계산하였다. 가시광선 영역의 투과도는 수소 플라즈마 노출 전의 투과도와 비교할 때 거의 변화가 없으나 스펙트럼의 흡수대가 짧은 파장쪽으로 이동하는 blue-shift 현상이 나타나고 있다. 이러한 사실은 수소의 유입으로 인하여 광학적 밴드 갭이 넓어지고 있음을 보여주고 있다. 이는 폭이

좁은 전도대가 쉽게 차버리기 때문에 일어나는 Burstein-Moss effect 인데 밴드 갭의 증가치  $\Delta E$ 는 다음과 같이 표현된다[16].

$$\Delta E = \frac{\hbar^2}{2m^*e} (3\pi^2)^{\frac{2}{3}} N^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

여기서  $\hbar$ 는 Planck 상수이고,  $m^*$ 는 유효질량(effective mass)이다. 이 식을 보면 운반자 농도,  $N$ 이 증가함에 따라 밴드 갭이 커짐을 알 수 있다. 물론 여기서 박막의 운반자는 대부분 전자이다. ZnO는 전형적인 n-type 반도체이며, 박막내의 전도 전자는 산소결핍에 주로 기인한다. AZO 박막이 수소 플라즈마에 노출되었을 때 수소와 박막 표면 또는 내에 있는 산소의 반응으로 박막의 산소 결핍이 심화되고, 여기서 발생한 여분의 전자들이 폭이 좁은 전도대를 채움으로 밴드 갭이 넓어지는 주된 원인이 된다. ZnO 에서의  $m^*$ 가 보통 0.35 m 정도이므로[17], 이를 식 (4)에 이용하면 그림 4에서 실온에서와 200°C의 경우 수소로 인한 운반자 농도 증가의 차이는 약  $8 \times 10^{19}/\text{cm}^3$  정도가 된다.

이러한 사실은 그림 5의 SZO 박막의 광투과 스펙트럼에서도 비슷한 결과를 확인할 수 있었다. SZO는 ITO에 비해 거의 안정적이며, 기판 온도가 300°C의 경우 AZO와 비슷한 정도로 밴드 갭이 이동하였다. 약간의 차이는 기판온도 100°C 근처에서는 SZO가 수소 플라즈마에 대해 더 민감하게 반응하였다. 이는 도핑물질의 차이에 따른 ZnO와 수소의 반응정도가 다르기 때문에 나타나는 현상으로 여겨지는데 수소와 ZnO 사이의 반응 에너지에 대한 구체적인 연구가 현재 진행 중에 있다.

이상의 결과에서 AZO, SZO 같은 ZnO계 박막은 수소 플라즈마 노출 시 수소의 반응으로 산소 결핍이 발생하나 ITO에 비해 이러한 환원반응이 매우 느리게 진행되기 때문에 박막의 광투과도에 거의 영향을 주지 않는 반면, ITO의 경우 환원반응이 상대적으로 빠르기 때문에 산소 결핍에 의한 박막의 구조 변화에 따른 광투과도 감소를 무시할 수 없게 된다.

그림 6은 수소 플라즈마에 30분간 노출 시킬 때, 시편 온도에 따른 AZO, SZO, ITO 박막의 비저항 변화이다. AZO, SZO 박막의 경우, 수소 플라즈마 노출 시 온도가 증가함에 따라 비저항이 감소함을 알 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 기판온도가 증가함에 따라 박막내의 산소와 주입한 수소 사이의 반응이 빨라지고 이에 기인

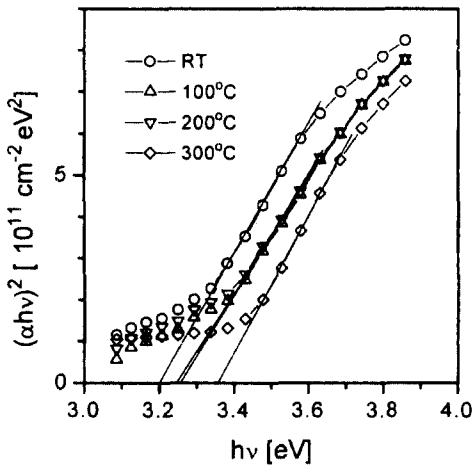
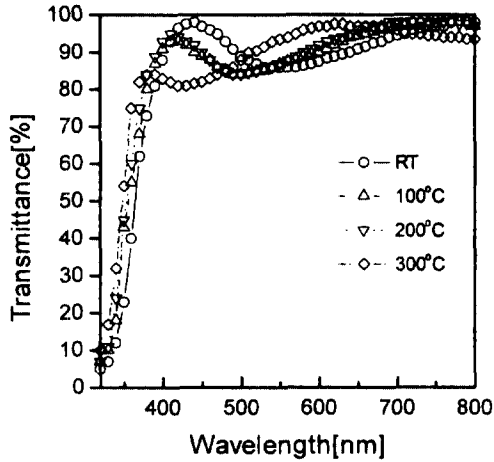


그림 5. 수소 플라즈마에 30분간 노출시켰을 때, 기판온도에 따른 SZO 박막의 광투과도 및 Tauc Plot. (○: 실온; △: 100°C; ▽: 200°C; ◇: 300°C)

하는 산소 결핍은 박막 내의 전자 농도를 증가시키며, 이는 다시  $1/\rho = ne\mu$ 에 의해 비저항 감소의 원인이 된다 ( $\rho$ : 비저항,  $n$ : 전자농도,  $e$ : 전하량,  $m$ : 이동도). 이러한 결과는 그림 4와 5 그리고 식 (4)를 통하여 투과 스펙트럼의 blue-shift 현상이 박막내의 전자 증가에 기인한다는 사실과 잘 일치한다. ITO의 경우는 광투과도 감소에도 불구하고(그림 2 참조) 비저항이 200°C까지는 거의 변화가 없었으나, 300°C에서 전도성이 사라졌다. 이는 ITO 박막이 수소와의 환원 반응으로 박막 내에 매우 큰 void를 형성하고 심지어 박막 자체가 기판과 탈착되고, 막의 표면이 갈라지기 때문이다. 이러한 현상은 광학 현미경이나 AFM을 통해서 관찰할 수 있었다.

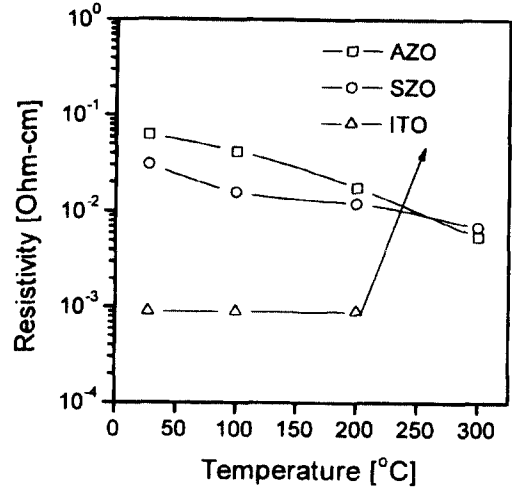


그림 6. 수소 플라즈마 노출시 기판온도에 따른 박막의 비저항 변화. (□: AZO; ○: SZO; △: ITO)

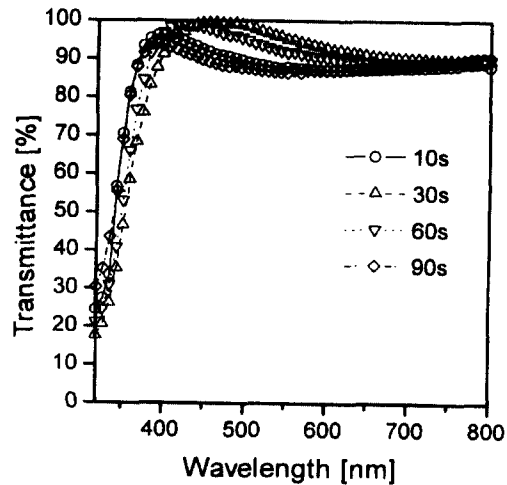


그림 7. 수소 플라즈마 노출시간에 따른 AZO 박막의 광투과도. (○: 10초; △: 30초; ▽: 60초; ◇: 90초, 기판온도는 250°C)

앞의 실험 결과들을 바탕으로 이 세가지 시편을 비정질 실리콘 증착의 적정 온도인 250°C로 고정하고 수소 플라즈마 노출 시간을 10, 30, 60, 90 초로 변화시켰다. 그림 7, 8은 수소 플라즈마 노출 시간에 따른 AZO, SZO 박막의 광투과도 스펙트럼이다. 수소 노출 시간에 거의 관계없이 가시광선 영역에서 모두 80% 이상의 높은 광투과도를 보였다.

그림 9는 수소 플라즈마 노출 시간에 따른 ITO 박막의 광투과도 스펙트럼이다. 10~60초까지는 광투과도는 전 가시광선 영역에서 조금씩 떨어지다가 90초에는 수

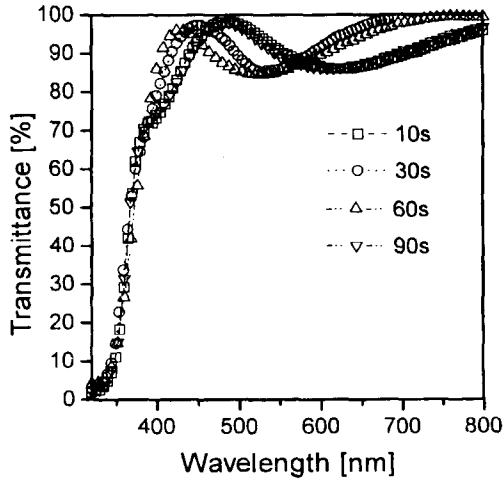


그림 8. 수소 플라즈마 노출시간에 따른 SZO 박막의 광투과도. (○: 10초; △: 30초; ▽: 60초; ◇: 90초, 기판온도는 250°C)

소 노출 전에 비해 약 10% 투과도가 감소하였다. 위의 결과에 의하면, ITO 박막이 수소 플라즈마에 90초 정도 노출되면  $In_2O_3$ 의 환원 반응에 의한 광투과도 감소를 무시할 수 없게 된다. 비정질 실리콘 박막을 증착할 경우에는 성장 속도가 비교적 빠르고 플라즈마 속의 수소 양도 본 실험의 경우보다는 적기 때문에 광투과도 감소에 의한 문제는 거의 없을 것으로 기대된다. 하지만  $\mu$ -Si를 증착하는 경우는 사용하는 수소량과 nucleation에

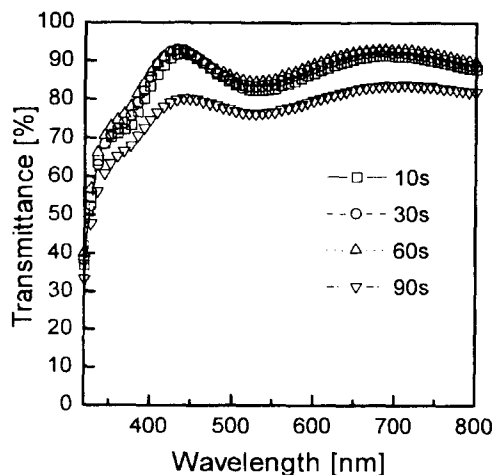


그림 9. 수소 플라즈마 노출시간에 따른 ITO 박막의 광투과도. (○: 10초; △: 30초; ▽: 60초; ◇: 90초, 기판온도는 250°C)

걸리는 시간이 그림 9에 사용한 실험조건과 거의 같기 때문에 상당히 큰 문제를 일으킬 수 있다. 나중에 논의하겠지만, 비정질 실리콘의 경우 ITO 박막의 실제 수소 플라즈마 노출 시간이 불과 수초 정도로 예상되나 완성된 태양전지의 효율을 감소 시킬 수 있는 가능성을 항상 내포하고 있다.

수소 플라즈마 노출에 대한 ITO의 급격한 전기 및 광학적 성질 변화의 원인을 조사하기 위해 AFM을 이용해 그 표면 구조를 관찰하였다. 그림 10은 AZO, SZO, ITO 박막의 수소 플라즈마 처리 후의 AFM 상이다. 상온에서 AZO와 SZO 박막의 표면 거칠기가 평균 150 Å 정도임을 알 수 있고, 100°C, 200°C, 300°C에서 처리한 박막의 경우 온도에 따라 뚜렷한 표면 변화가 관찰되지 않았다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 ZnO 계 층, AZO와 SZO 박막이 수소 플라즈마 노출에 대해 구조적으로 매우 안정적이라는 사실을 뒷받침해 주고 있다. 반면 ITO의 경우는 수소 플라즈마 노출 시 기판의 온도가 증가할수록 표면의 거칠기가 심화됨을 알 수 있었다. 상온에서의 거칠기는 대략 150 Å, 100°C는 170 Å, 200°C는 200 Å으로 차츰 증가하다가 300°C에서는 2500 Å 정도로 급격히 증가하였다. 그림 10-f)를 보면 알 수 있듯이 300°C에서 박막의 표면에 커다란 입자의 형태가 나타나는데 이는 ITO 박막내의  $In_2O_3$  환원 반응의 증거이며, 이러한 표면 거칠기는 indium 환원으로 생긴 내부의 black matrix와 더불어 박막의 광투과도를 떨어뜨리게 되는 주된 원인이 된다.

이렇게 환원된 금속입자들은 광학현미경(Examet Union 82041)로 보면 그 구조를 더 명확히 알 수 있다. 그림 11은 300°C에서 30분간 수소에 노출된 ITO의 표면을 1100배(그림상의 한 눈금은 약 0.1  $\mu$ m)로 확대한 사진이다. 그림에서 보듯이 환원 후 남은  $\mu$ m 금속입자들이 뭉쳐져 있다. 이 작은 덩어들이 광산란을 일으키는 원인이 된다.

전반적인 연구를 통하여 알 수 있듯이 AZO와 SZO가 ITO에 비해 수소 노출에 거의 안정적이다. 하지만 태양전지 제작시 수소 유입으로 인한 AZO와 SZO 표면에서의 전도도 증가가 태양전지의 기능에 미치는 영향에 대한 연구는 계속되어야 할 것이다. 또한 ITO의 경우  $\mu$ -Si 증착의 경우를 제외하고는 본 연구에 사용한 수소량과 노출시간이 실제 경우보다 많다. 따라서 비정질 실리콘의 증착시 ITO 표면 근처의 수십 Å 정도의 피해는 투과도 측면에서만 본다면 극히 미미하다. 하지만 수십 Å의 ITO

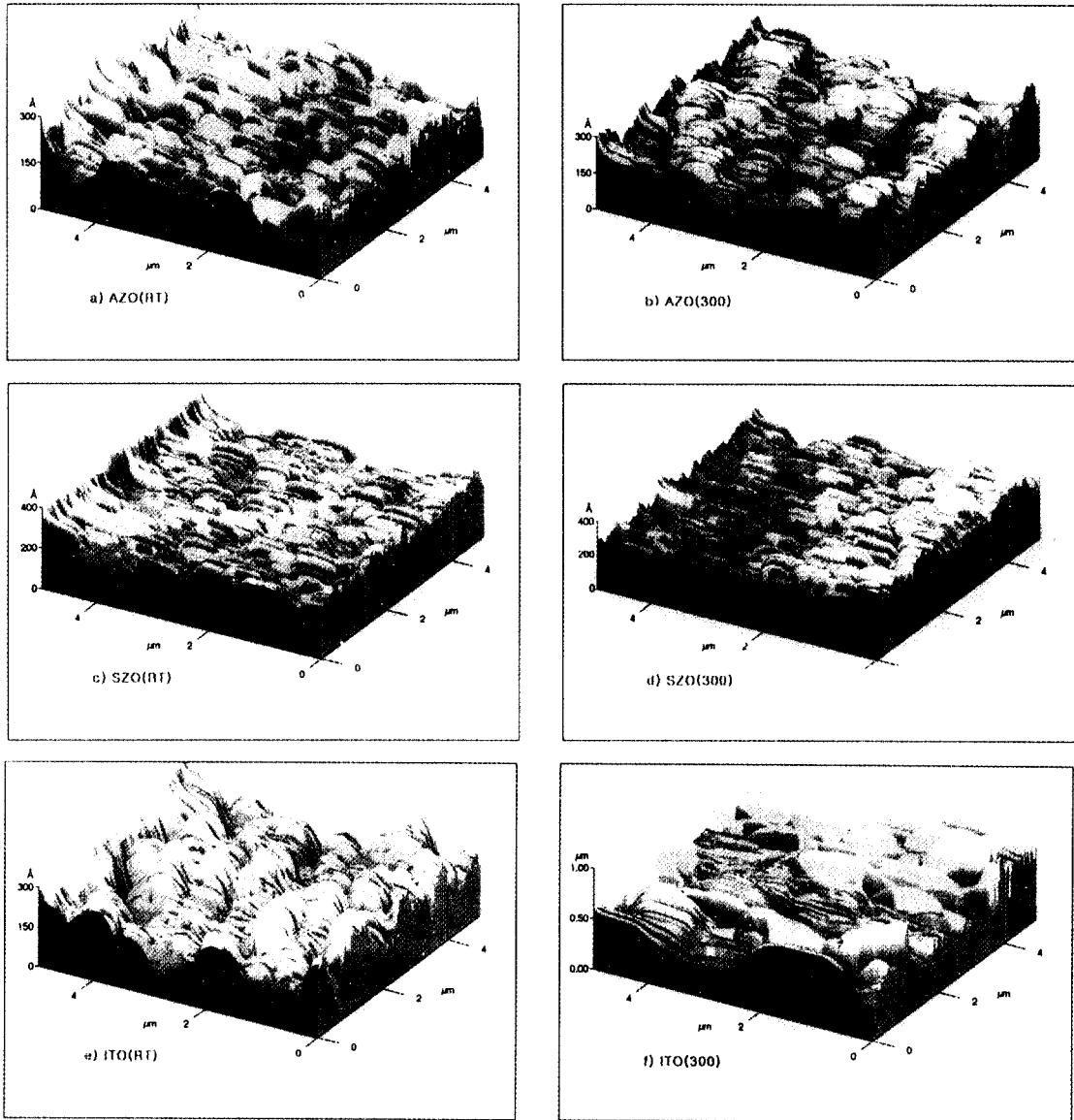


그림 10. 수소 플라즈마 노출시 기판온도에 따른 AZO, SZO, ITO 박막의 AFM상. (a) AZO(RT), b) AZO(300°C), c) SZO(RT), d)SZO(300°C), e)ITO(RT), f)ITO(300°C).

층이 환원되면서 발생한 금속입자들은 ITO와 비정질 실리콘의 계면에 존재하게 된다. 따라서 이 입자들이 비정질 실리콘 속으로 확산된다고 가정하면, 장기적으로 태양전지에 미치게 영향이 어떻게 나타날지도 연구해야 한다.

본 연구에 있어서 수소 플라즈마 대신 텅스텐 필라멘트를 가열하여 발생시킨 수소 원자에 대한 노출에서도 전반적으로 같은 실험 결과를 얻었다[18].

#### 4. 결 론

ITO, AZO, SZO 박막을 수소 플라즈마 또는 수소 원자에 노출시켜 기판온도 및 노출 시간에 따른 박막의 전기, 광학 및 구조적 변화를 관찰하였다. AZO, SZO 박막의 경우 수소유입으로 인한 산소결핍으로 도핑효과가 증대되어 Burstein-Moss 현상을 보여 주었고 따라서 이

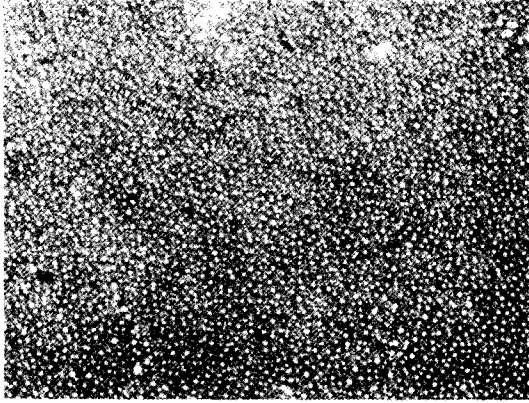


그림 11. 수소 플라즈마 노출후 ITO 표면의 광학현미경 상. ( $\times 1100$ ; 한눈금이 약  $0.9 \mu\text{m}$ ).

에 따른 전도도의 증가가 따랐다. 반면 ITO의 경우에는 전반적인 투과도 감소가 따랐는데 특정 조건 이상에서는 투과도의 심한 손실과 함께 전도도의 상실을 보여주었다. 이는 수소 노출에 대해 AZO와 SZO가 구조적으로 안정됨을 보인 반면 ITO는 거의 완전한 환원현상으로 구조가 파괴되었기 때문이었다. 또한 ITO와 비정질 실리콘 계면에서 환원에 따른 금속입자의 오염이 예상된다. 따라서 수소의 유입이 따르는 비정질 실리콘을 이용한 태양전지 제작에 있어 ZnO를 바탕으로 한 물질이 더 안정적일 것으로 기대된다. 하지만 ZnO 박막과 비정질 실리콘 박막 사이에서의 계면 효과에 대한 연구는 아직 미비하므로 전도성 향상과 더불어 이에 대한 더 많은 연구가 필요하다.

### 감사의 글

이 연구는 한국과학 재단의 핵심연구 과제(핵심 951-0209-039-2)로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. S. Honda, A. Tsujimoto, M. Watamori and K. Oura, *J. Vac. Sci. Technol. A* **13**(3), 1100 (1995).
2. Hamberg and C. G. Granqvist, *J. Appl. Phys.* **60**, R 123 (1986).
3. K. L. Chopra, S. Major and D. K. pandya, *Thin Solid Films* **102**, 1 (1983).
4. L. Minami, H. Nanto, and S. Takata, *Jpn. J. Appl. Phys.* **23**, 1280 (1984).
5. D. Raviendra and J. K. Shrama, *J. Appl. Phys.* **58**, 838 (1985).
6. Kentaro Ito, *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.* **22**, L245 (1995).
7. T. Minami, H. Sohara, S. Takata, and I. Fukuda, *J. Vac. Sci. Technol. A* **13**(3), 1053 (1995).
8. Z. C. Jin, I. Hamberg, and C. G. Graqvist, *J. Appl. Phys.* **64**(10), 5117 (1988).
9. Y. Igasaki and H. Saito, *J. Appl. Phys.* **70**(7), 3613 (1991).
10. T. Minami, H. Sato, H. Nanto and S. Takata, *Jpn. J. Appl. Phys.* **25**(9), L776 (1986).
11. I. An, Y. Lu, C. R. Wronski and R. W. Collins, *Appl. Phys. Lett.* **64**, 3317 (1994).
12. 이창효, 이상기, 김경인, 김용주, 임원택, 한양대 기초과학 논문집, **13**, 99 (1994).
13. M. Kiwagawa, K. Mori, S. Ishihara, M. Ohno, T. Hirao, Y. Yoshioka and S. Kohiki, *J. Appl. Phys.* **54**(6), 3269 (1983).
14. Georg Hass, *Physics of Thin Films*, **9**, Academic Press (1975).
15. David R. Lide, **Handbook of Chemistry and Physics**, CRC Press (1991).
16. A. Valentini, F. Quaranta, M. Penza, and F. R. Rizzi, *J. Appl. Phys.* **73**(3), 1143 (1993).
17. A. Sarkar, S. Ghosh, S. Chaudhuri, and A. K. Pal, *Thin Solid Films*, **204**, 255 (1991).
18. 안유신, 임원택, 안일신, 이창효, 한국진공학회 제 12회 학술발표회, 124 (1997).